УДК 681.487.621.313

# СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

С.В. Кокорев*, В.Г. Букреев

*Сибирский химический комбинат. г. Северск
Томский политехнический университет
E-mail: SVKokorev@rambler.ru

*Рассматривается структура системы автоматического управления технологическим объектом на основе теории нечетких множеств. Приведены результаты моделирования нечеткого регулятора и оценка его эффективности по сравнению с двухпозиционным и пропорционально-интегрально-дифференциальным регуляторами.*

Качество протекания технологического процесса в значительной степени зависит от правильного выбора и точности настройки регуляторов, применяемых в автоматизированных системах управления. В настоящее время температурными режимами многих технологических объектов управляют системы, использующие двухпозиционное регулирование, либо пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы или его модификации [1].

Точность поддержания температуры на заданном уровне при двухпозиционном способе регулирования зависит от двух факторов: точности измерения температуры регистрирующим прибором (погрешности термопары, пирометра и т.д.) и предельной коммутационной способности исполнительного элемента системы регулирования температуры (контактора или тиристорного регулятора напряжения).

Следует отметить тот факт, что предельная коммутационная способность полупроводниковых систем регулирования напряжения намного выше, чем у контакторной коммутационной аппаратуры. То есть, в случае использования полупроводниковых систем регулирования напряжения основным фактором, влияющим на точность поддержания температуры, будет являться точность измерения температуры регистрирующим прибором, а в случае применения контакторов – их предельная коммутационная способность.

В случае использования классических регуляторов совместно с тиристорным регулятором напряжения появляется возможность плавного регулирования мощности, подводимой к электронагревателям. В этом случае точность стабилизации температуры на заданном уровне помимо точности измерения температуры регистрирующим прибором зависит от настройки регуляторов. Однако для определения параметров классических регуляторов необходима адекватная математическая модель объекта управления. Одним из методов построения такой модели является статистический подход, который предполагает наличие экспериментальных данных регулируемых переменных для конкретного режима

работы оборудования. Следует отметить тот факт, что не все требуемые переменные объекта управления поддаются статистическому анализу виду того, что их измерение либо затруднено, либо вообще невозможно и, следовательно, существенно снижается адекватность модели реальному процессу.

Классические ПИД-регуляторы для формирования сигнала управления используют методы численного интегрирования и дифференцирования входного сигнала. Однако у регуляторов с фиксированной структурой отсутствует возможность вычисления сигнала управления с учетом нестационарности параметров технологического объекта. Формирование сигнала управления в таких условиях становится возможным при использовании адаптивных систем управления, либо регуляторов, реализованных на основе теории нечетких множеств [2].

Большинство адаптивных систем управления организуется на классических регуляторах или с использованием эталонной модели объекта управления. В свою очередь, нечеткие регуляторы используют экспертные знания (особенности регулируемого процесса) для управления объектом. Следовательно, для настройки таких регуляторов нет необходимости создавать адекватную математическую модель объекта управления, достаточно лишь знать принципы и особенности регулирования переменных объекта управления.

В статье рассматривается реализация системы регулирования температуры греющей камеры барабанной печи на основе нечеткой логики, структура которой представлена на рис. 1.

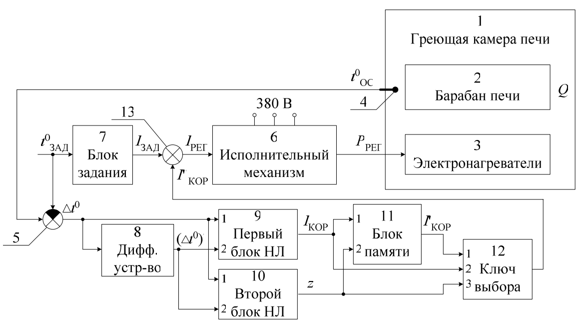



*Рис. 1. Структура системы нечеткого регулирования температуры: датчик – 4 текущей температуры, размещенный в греющей камере – 1 печи, блок сравнения – 5, блок задания – 7, дифференцирующее устройство – 8, первый блок нечеткой логики (НЛ) – 9, второй блок НЛ – 10, блок памяти – 11, ключ выбора – 12, сумматор – 13 и исполнительный элемент – 6*

Сигналы значения температуры от времени, формируемые внешним задатчиком, поступающие на вход блока – 7 и снимаются экспериментально путем разогрева греющей камеры печи без технологического сырья и при разомкнутом контуре системы управления. При этом сигнал $I_{ЗАД}$ задания исполнительному механизму – 6 аппроксимируется выражением:

$$I_{ЗАД}=k_1 \cdot t^0_{ЗАД0}+k_2 \cdot t^0_{ЗАД},$$

где $k_1$, $k_2$ – масштабирующие коэффициенты; $t^0_{ЗАД0}$ – температура окружающей среды.

Параметры первого блока нечеткой логики представлены на рис. 2–4 и в табл. 1, второго блока нечеткой логики – на рис. 5–7 и в табл. 2.

Рассматриваемая система регулирования температуры функционирует следующим образом.

Заданное значение температуры $t^0_{ЗАД}$ в греющей камере – 1 печи поступает на вход блока – 7 и блока – 5. В соответствии с приведенным выше выражением блок – 7 формирует сигнал задания $I_{ЗАД}$, поступающий на сумматор – 13. Температура в греющей камере – 1 печи измеряется термопарой – 4 и сигнал обратной связи $t^0_{ОС}$ поступает на блок – 5, в котором вычисляется значение сигнала рассогласования $\Delta t^0$ текущей температуры $t^0$ с заданным значением $t^0_{ЗАД}$. Сигнал $\Delta t^0$ поступает на вход дифференцирующего устройства – 8, на первые входы блоков – 9 и 10. В устройстве – 8 вычисляется скорость $(\Delta t^0)'$ изменения значений рассогласования $\Delta t^0$ текущей температуры. Сигнал $(\Delta t^0)'$ поступает на вторые входы блоков – 9 и 10.

Численные значения рассогласования $\Delta t^0$ преобразуются блоком 9 в нечеткие сигналы: "малое отрицательное 1" (М.О.1), "малое отрицательное 2" (М.О.2), "большое отрицательное 1" (Б.О.1), "большое отрицательное 2" (Б.О.2), "малое положительное 1" (М.П.1), "малое положительное 2" (М.П.2), "большое положительное 1" (Б.П.1), "большое положительное 2" (Б.П.2), рис. 2, с различной степенью принадлежности $\mu$ [2].

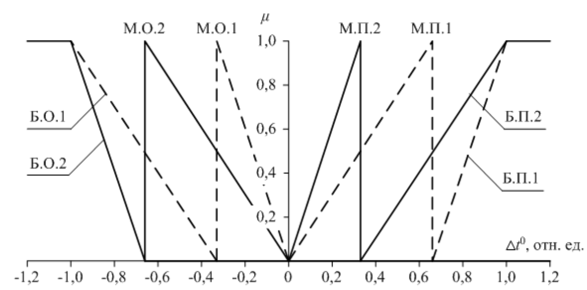



*Рис. 2. Функции преобразования значения рассогласования текущей температуры с заданной к нечеткому виду в первом блоке нечеткой логики*

Также первый блок нечеткой логики преобразует скорость изменения значения рассогласования $(\Delta t^0)'$ в зависимости от численного значения в нечеткие сигналы: "отрицательная" (Отр.) и "положительная" (Пол.) (рис. 3) с различной степенью принадлежности $\mu$.

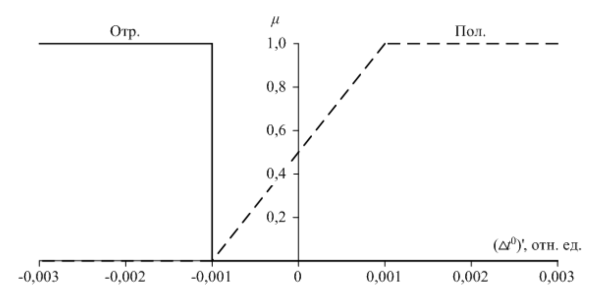



*Рис. 3. Функции преобразования скорости изменения значения рассогласования к нечеткому виду в первом блоке нечеткой логики*

Используя полученные степени принадлежности нечетких значений $\Delta t^0$ и $(\Delta t^0)'$ согласно базе знаний (табл. 1) первый блок нечеткой логики присваивает сигналу коррекции возмущения $I_{КОР}$ одно из следующих нечетких значений: "большой положительный" (Б.П.), "средний положительный" (С.П.), "малый положительный" (М.П.), "малый отрицательный" (М.О.), "средний отрицательный" (С.О.), "большой отрицательный" (Б.О.).

***Таблица 1.*** *База знаний первого блока нечеткой логики для формирования сигнала коррекции в нечетком виде*

| | | $\Delta t^0$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Б.П.1 | М.П.1 | Б.О.1 | М.О.1 | Б.П.2 | М.П.2 | Б.О.2 | М.О.2 |
| $(\Delta t^0)'$ | Отр. | С.П. | М.П. | Б.О. | С.О. | – | – | – | – |
| | Пол. | – | – | – | – | Б.П. | С.П. | С.О. | М.О. |

Полученное нечеткое значение текущего сигнала коррекции возмущения $I_{КОР}$ в первом блоке нечеткой логики преобразуется в численное значение (рис. 4) в зависимости от степени принадлежности $\mu$ [2].

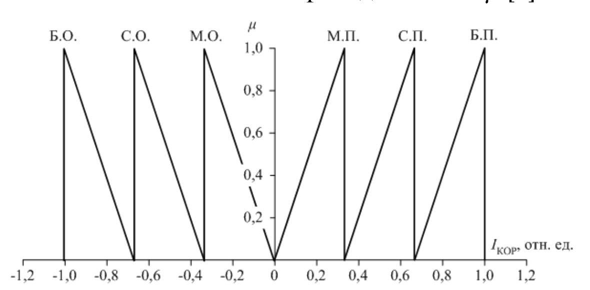



***Рис. 4.*** *Функции преобразования сигнала коррекции из нечеткого вида в численное значение в первом блоке нечеткой логики*

Текущий сигнал коррекции возмущения $I_{КОР}$ поступает на первый вход блока памяти – 11 и на второй вход ключа выбора – 12.

Численные значения рассогласования $\Delta t^0$ преобразуются блоком – 10 в нечеткие сигналы: "отрицательное" (Отр.), "отрицательное нулевое" (О.Н.), "положительное нулевое" (П.Н.), "положительное" (П.), рис. 5, с различной степенью принадлежности $\mu$.

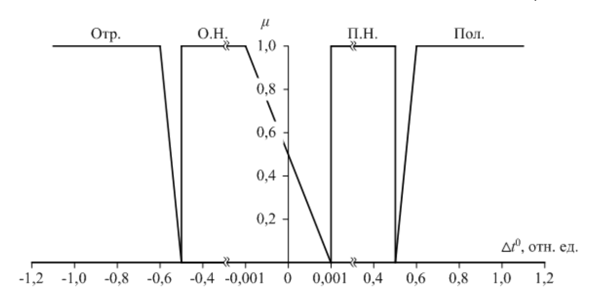



***Рис. 5.*** *Функции преобразования значения рассогласования текущей температуры с заданной к нечеткому виду во втором блоке нечеткой логики*

Также второй блок нечеткой логики преобразует скорость изменения значения рассогласования $(\Delta t^0)'$ в зависимости от численного значения в нечеткие сигналы: "отрицательная" (Отр.) и "положительная" (Пол.), рис. 6, с различной степенью принадлежности $\mu$.

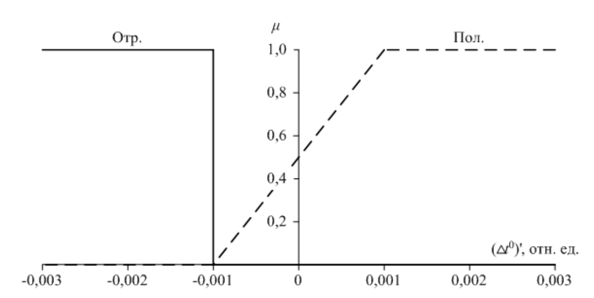



***Рис. 6.*** *Функции преобразования скорости изменения значения рассогласования к нечеткому виду во втором блоке нечеткой логики*

Используя полученные степени принадлежности нечетких значений $\Delta t^0$ и $(\Delta t^0)'$ согласно базе знаний (табл. 2) второй блок нечеткой логики присваивает выходному сигналу $z$ одно из следующих нечетких значений: "коррекция" (Кор.) и "запоминание" (Зап.).

***Таблица 2.*** *База знаний второго блока нечеткой логики для формирования выходного сигнала в нечетком виде*

| | | $\Delta t^0$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Пол. | П.Н. | О.Н. | Отр. | Пол. | П.Н. | О.Н. | Отр. |
| $(\Delta t^0)'$ | Отр. | Кор. | Зап. | Кор. | Кор. | – | – | – | – |
| | Пол. | – | – | – | – | Кор. | Кор. | Зап. | Кор. |

Полученное нечеткое значение выходного сигнала $z$ во втором блоке нечеткой логики преобразуется в численное значение (рис. 7) в зависимости от степени принадлежности $\mu$.

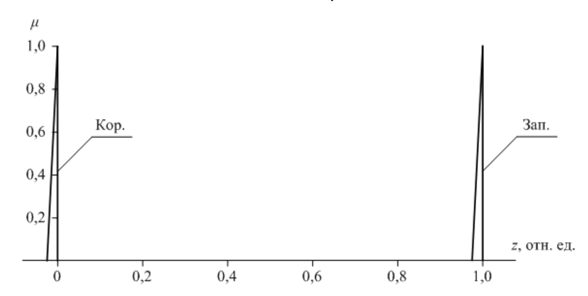



***Рис. 7.*** *Функции преобразования сигнала коррекции из нечеткого вида в численное значение во втором блоке нечеткой логики*

Выходной сигнал $z$ поступает на второй вход блока памяти – 11 и на третий вход ключа выбора – 12. Блок памяти в зависимости от изменения сигнала $z$ запоминает текущее значение сигнала $I_{КОР}$, рис. 8.

Алгоритмы работы блока памяти – 11 и ключа выбора – 12 представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Выходной сигнал $I'_{КОР}$ блока памяти – 11 поступает на первый вход ключа выбора – 12, который в зависимости от величины сигнала $z$ присваивает выходному сигналу $I''_{КОР}$ значение сигнала $I_{КОР}$ или $I'_{КОР}$, рис. 9.

Выходной сигнал $I''_{КОР}$ ключа выбора – 12 поступает на сумматор – 13. Сумматор – 13 формирует сигнал задания исполнительному механизму – 6 согласно выражению:

$$I_{УПР} = I_{ЗАД} + I''_{КОР}.$$

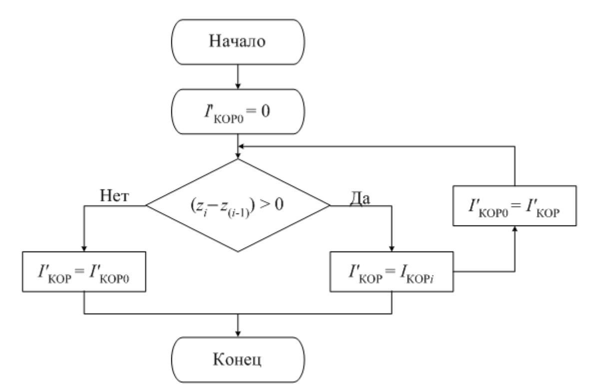



***Рис. 8.*** *Алгоритм работы блока памяти. $I_{КОР0}$ – начальное значение выходного сигнала; $I_{КОРi}$ – текущее значение входного сигнала; i – шаг квантования*

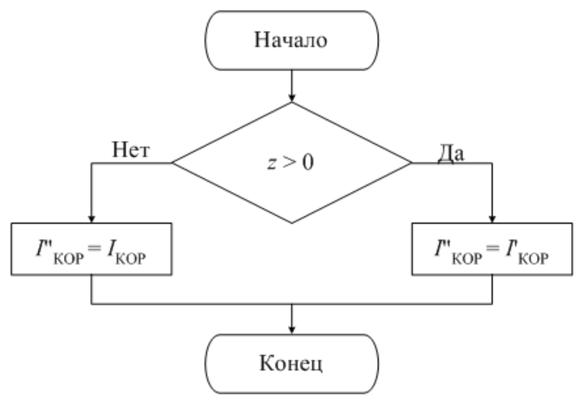



***Рис. 9.*** *Алгоритм работы ключа выбора*

Сигнал $I_{УПР}$ поступает на вход исполнительного механизма 6, который плавно изменяет количество электрической энергии $P_{РЕГ}$, поступающее к электронагревателям – 3. В свою очередь электронагреватели – 3 преобразуют электрическую энергию $P_{РЕГ}$ в тепловую энергию $Q$, расходуемую на нагрев барабана печи – 2 и поддержание заданной температуры в греющей камере – 1 печи.

Рассматриваемая система нечеткого регулирования температуры в греющей камере печи апробирована на имитационной модели в среде MATLAB. Для сравнительного анализа приведены графики поддержания заданной температуры в греющей камере печи существующей системой регулирования температуры, использующей двухпозиционный регулятор, системой с ПИД-регулятором, и при помощи системы с нечетким регулятором, рис. 10.

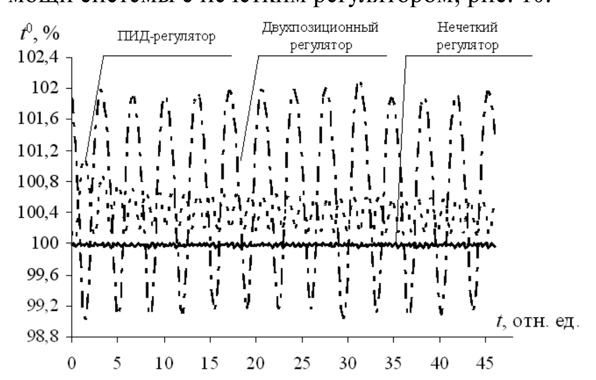



***Рис. 10.*** *Сравнение систем регулирования температуры*

Результаты исследований показали, что внедрение предложенной системы благодаря применению алгоритмов нечеткого управления, разработанных специально для регулирования температуры в греющей камере печи, позволит повысить точность поддержания заданной температуры относительно двухпозиционного регулирования на 0,98 и 1,3 % для ПИД- и нечеткого регуляторов и обеспечит экономию энергоресурсов на 2,39 и 3,68 % соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена, М.Д. Бершицкого, М.Я. Смелянского, В.М. Эдемского. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.